中天山巴音布鲁克盆地暖季降水日变化特征

刁　鹏，　周雪英，　尼米才仁·努加，　刘长墉

（巴音郭楞蒙古自治州气象局，新疆 库尔勒　841000）

摘　要：降水日变化作为最基本的气候变化形式，能更准确揭示气候变化对区域水资源的影响。为此，基于2017—2023年巴音布鲁克盆地18个气象观测站点5—9月（暖季）的逐时降水资料，对该区域小时尺度降水规律进行了分析。结果表明：(1) 巴音布鲁克盆地暖季降水量、降水频次及降水强度的日变化特征基本一致，但在不同时间尺度上具有差异性。其中年尺度上，降水量、降水强度多在昼间增加，降水频次则在夜间增加；月尺度上，三者多在下午至前半夜时段增多，而一天内，18:00—24:00时段不仅降水易发，且降水量多、强度大，07:00—10:00时段则相反。(2) 小时雨强（R_1）以$R_1 \leqslant$ 2.0 mm量级为主，不仅降水量大，降水频次也多，其次为2.1 mm$\leqslant R_1 \leqslant$4.0 mm量级。(3) 过程降水量（R）在午后时段不仅频发，且贡献最大，其中以0.1 mm$\leqslant R \leqslant$6.0 mm的小雨降水过程为主，但$R \geqslant$12.1 mm的大到暴雨降水过程贡献最大。(4) 在不同持续时间降水中，6 h以上的长历时降水贡献最大，但1~3 h的短历时降水易频发，且多出现在15:00—20:00时段。

关 键 词：暖季；降水日变化；降水持续性；巴音布鲁克

文章编号：1000－6060(2024)12－2093－11(2093～2103)

降水日变化作为地球上天气和气候变化中最显著的信号之一，其形成与各种日变化现象紧密联系[1]，但受地形、纬度、大气环流、天气系统和海陆分布的影响，不同区域的降水量、时间分布、频率和极端程度存在显著区别，而这些变化与人们日常生活存在紧密联系[2]，因而，2005年世界气候研究计划（WCRP）将降水日变化特征的研究确立为需要特别重视和关注的科学问题[3]。

作为当前气候研究领域的一个热点议题，研究降水日变化特征不仅可以加深对影响区域气候变化的动力、热力过程的认识，还对促进理解降水形成机制，评估数值模拟可靠性，以及提高天气预报准确率和防灾减灾等方面具有重要意义[4-6]。目前国内外学者已开展了许多研究工作：如Kincer[7]在20世纪初曾指出，美国东南沿海台站的降水峰值出现在下午，而中部大多数台站出现在夜间；Yu等[8]研究发现中国夏季降水日变化特征在空间分布上存在显著区域差异；薛羽君等[9]、唐红玉等[10]分别研究了四川盆地及西南等地区的降水日变化特征，得出四川、重庆和贵州部分地区的夜雨较频繁，云南则以昼雨为主；He等[11]发现华北地区的燕山、太行山一带暖季日降水峰值经常出现在中午和下午，北方草原于夜间和凌晨达到峰值。

新疆位于我国西北干旱区，虽然降水总量相对不大，但“三山夹两盆”的独特地理特征，吸引了众多学者研究该地降水日变化特征。如朱小凡等[12]发现新疆夏季的逐时降水量和降水频率，北疆大于南疆，山区大于盆地；陈春艳等[13]揭示了暖湿背景下，新疆逐时降水频次呈西北多、东南少的特征；郑博华等[14]发现伊犁河谷暖季山区降水量和降水频次明显高于平原区，而冷季山区则低于平原区；杨霞等[15]对比乌鲁木齐市冬季降雪和夏季降雨的区

收稿日期：2024-02-28；　**修订日期：**2024-05-08

基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金（2023D01F29）；新疆维吾尔自治区科技厅天山英才项目（2023TSYCJC0064）；新疆气象局创新发展专项面上项目（MS202301）资助

作者简介：刁鹏（1990-），男，本科，工程师，主要从事人工影响天气研究. E-mail: diaopeng0906@163.com

通讯作者：周雪英（1982-），女，高级工程师，主要从事天气预报预警技术和天气机理研究. E-mail: zhouxueying2004@163.com

域差异，发现城区多发冬季强降雪，山区则更易出现夏季强降雨。综上发现，新疆降水日变化特征不仅在区域上有差异，在各时期也相异，因而分析降水日变化特征时，考虑时间尺度的区别，能更好理解其气候规律。

随着全球气候变化，以及新疆极端降水增多趋势情况下[16]，小时尺度资料具有较高时间分辨率，更能准确反映出降水变化规律和梳理形成机制。巴音布鲁克盆地作为全球气候变化响应敏感的典型高寒山区盆地[17]，对该区域的降水研究大多利用日降水及以上时间尺度的实测资料[18]，少有小时尺度实测资料的分析。因此，本文基于巴音布鲁克盆地2017—2023年暖季(5—9月)逐时降水资料，分析各时间尺度下的降水日变化特征，以期为当地气象服务以及人工影响天气业务工作提供技术支撑。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

巴音布鲁克盆地位于我国天山山区中部，四周高山环绕，底部地势平坦，面积约2.3×10^4 km^2，其内不仅有大面积的沼泽草地和湖泊，还有一定面积的永久性积雪和冰川。由于海拔普遍在2400 m以上，具有冬长夏短，蒸发量较少，全年气温较低，积雪日数多的高寒山区气候特点。受全球气候系统变化影响，小时尺度的降水规律、演变机制已成为必不可少的研究目标，因而积极了解研究区的降水日变化特征，不仅有助于提升降水预报率，也对防灾减灾的开展具有指导意义。

1.2 数据来源

本文采用新疆气象信息中心提供的巴音布鲁克盆地1个国家基本气象站和17个区域观测站点(图1)2017—2023年暖季(5—9月)逐时降水数据进行研究。在对数据处理分析时，将数据转为北京时间后，采用区域极值、时间一致性等检查方法[19-20]，对站点逐时降水数据进行了质量控制。其中极值检查中，以国家气象站1990—2023年5—9月逐时降水数据为参考依据，计算出逐时降水的平均和标准差，确定检验临界值范围为平均值±5倍标准差，如被检数据值超过临界值，则认为数据异常；时间一致性检查中，判定连续6个及以上小时降水量相等且范围在0~0.5 mm，连续5个及以上小时降水量相等且范围在0.5~1 mm，连续4个及以上小时降水量相等且大于1 mm时，则认为数据异常。按照上述方法，在剔除异常和缺测的数据后，有16个站点的数据可用率在95%以上，仅站点Y8344、Y8317的数据可用率在85%左右。数据整体完整性较好，后续分析时将18个站点按照相同年、月、日及小时计算逐时的要素平均值以代表研究区，若某一站点相应时刻数据缺测，则不纳入计算。

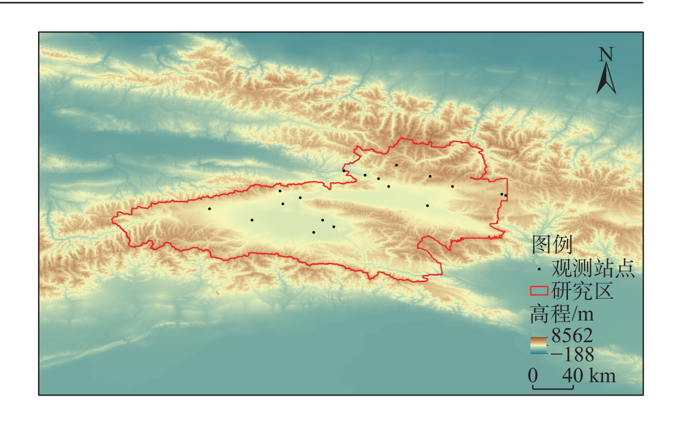


图1 研究区观测站点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of observation stations in the study area

1.3 分析方法

在分析过程中，判定小时降水量≥0.1 mm的时刻为有降水发生，基于此统计降水量、降水频次和降水强度(降水量与降水频次的比值)等指标[21]用于分析巴音布鲁克盆地暖季降水的日变化特征。降水等级对降水日变化分布特征的影响不容忽视[22]，因此将单位时间的降雨量即雨强(R_1)，按照1 h降雨量大小分为4个量级，即$R_1\leq2.0$ mm，2.1 mm$\leq R_1\leq$4.0 mm，4.1 mm$\leq R_1\leq$6.0 mm，6.1 mm$\leq R_1$，用于统计分析其变化。为客观判断降水的持续性，将降水自开始时次到连续2 h未发生降水，判定为一次降水过程的结束，把一次降水事件从开始到结束的小时数定义为一次降水的持续时间[23]，并结合新疆气象局日降水量等级标准[24]，将过程降水量(R)分为3个不同量级进行研究，分别为小雨过程0.1 mm$\leq R\leq$6.0 mm，中雨过程6.1 mm$\leq R\leq$12.0 mm以及大到暴雨过程$R\geq$12.1 mm。考虑研究区所处时区[25]，将每日09:00—20:00时段分为昼间，其中09:00—14:00时段与15:00—20:00时段又分为上、下午，而21:00—08:00时段分为夜间，其中21:00—02:00时段与03:00—08:00时段分为前、后半夜，所用时间均为北京时。

2　结果与分析

2.1　降水日变化特征

2.1.1　降水量　由图2可知，降水量的逐时变化在各时间尺度上存在明显差异。年际上（图2a），逐时降水量高值区在2019年前主要出现在21:00—02:00时段，2019—2022年间则集中在13:00—20:00时段，2023年则出现在10:00—14:00时段和22:00—03:00时段；整体看，昼间各时降水量多呈增长趋势，夜间多呈减少趋势，说明年际增加，降水量将昼间越来越多，夜间越来越少。各月上（图2b），逐时降水量的高值区各异，其中5月在11:00—13:00时段，6—8月主要出现在15:00—03:00时段，而9月在21:00—01:00时段，高值区的变化表明，随着月份增加，降水量将在前半夜时段增多，上午时段减少。在日内（图2c），降水量呈单峰分布，峰值出现在18:00，高值主要在18:00—24:00时段，而峰谷出现在08:00，低值集中在7:00—10:00时段。综上，随着时间变化，降水量将在年尺度的昼间，月尺度的前半夜时段，日变化的下午时段增加明显。

2.1.2　降水频次　由图3可得，累积降水频次的逐时演变与降水量较为一致。年际上（图3a），除2018—2019年外，其余年份的降水事件易出现在17:00—01:00时段，而2018年降水更易发生在01:00—07:00时段，2019年则易出现在11:00—18:00时段和22:00—02:00时段。整体看，除19:00—21:00时段外，降水频次普遍呈减少趋势，表明年际增加，降水更易在19:00—21:00时段发生。各月上（图3b），降水易发时段有差异，其中5—6月主要在10:00—20:00时段，7—8月集中在19:00—04:00时段，而9月以18:00—24:00时段为主。整体看，除8—9月表现为双峰型外，其余月份多为单峰型，同时昼间各时累积降水频次多呈减少趋势，而夜间呈增多趋势，说明月份增加，降水事件更易出现在夜间。在日内（图3c），累积降水频次也呈单峰分布，高值时段主要在18:00至翌日02:00，其中18:00达到峰值，为91.94次，而低值时段为6:00—10:00，峰谷出现在8:00，为67.22次。由此可知，降水频次在年尺度、月尺度及日变化的下午至前半夜时段增加明显。

2.1.3　降水强度　由图4所示，各时间尺度下的降水强度日变化特征与降水量和降水频次存在显著差异。年际上（图4a），2019—2021年的逐时降水强度高值较集中在13:00—20:00时段，而其余年份高值多在20:00—02:00时段。整体看，降水强度幅度在10:00增加最多，在21:00减少最多，同时除下午时段的降水强度呈减少趋势外，其余时段多为增加趋势，尤其上午时段多数时刻增加趋势明显，说明年际增加，降水强度在上午时段较大，下午时段较小。各月上（图4b），降水强度高值多出现在11:00—01:00时段，低值则出现在05:00—10:00时段，其中8月的15:00和17:00的降水强度最大，均为1.13 $\mathrm{mm \cdot h^{-1}}$，而9月的09:00最小，为0.39 $\mathrm{mm \cdot h^{-1}}$。整体看，各时降水强度在前半夜时段呈较明显增加趋势，而后半

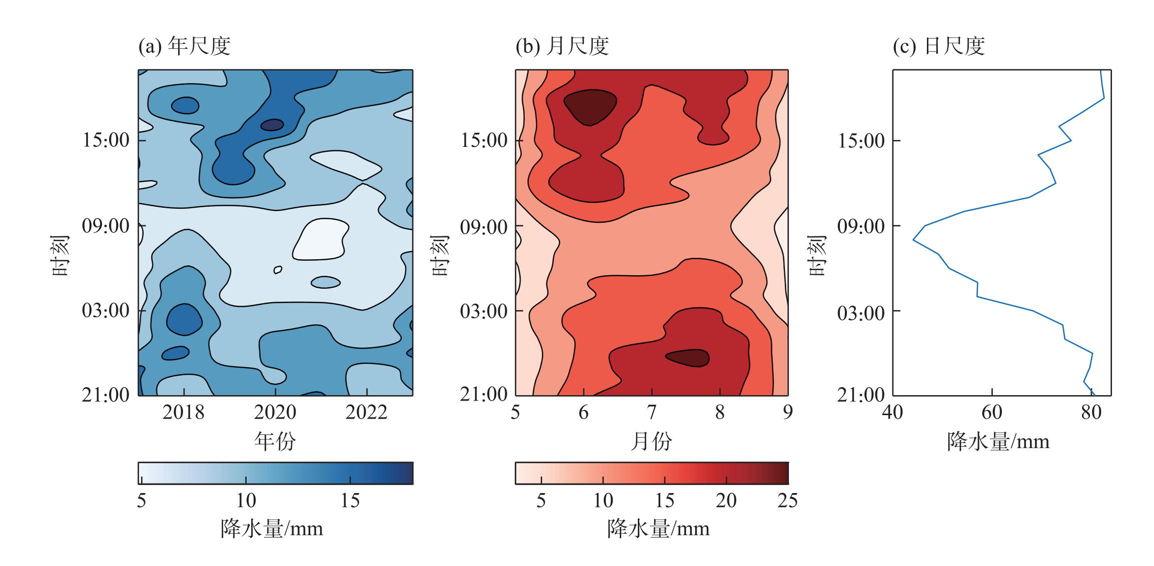


图2　不同时间尺度的逐时累积降水量变化

Fig. 2　Hourly variation of cumulative precipitation at different time scales

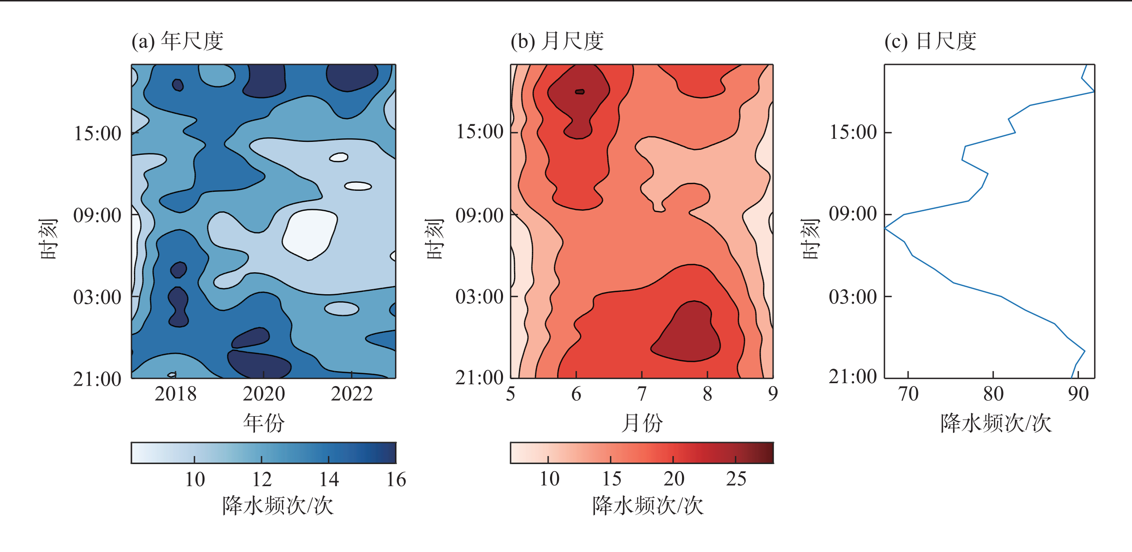


图3 不同时间尺度的逐时累积降水频次变化

Fig. 3 Hourly variation of cumulative precipitation frequency at different time scales

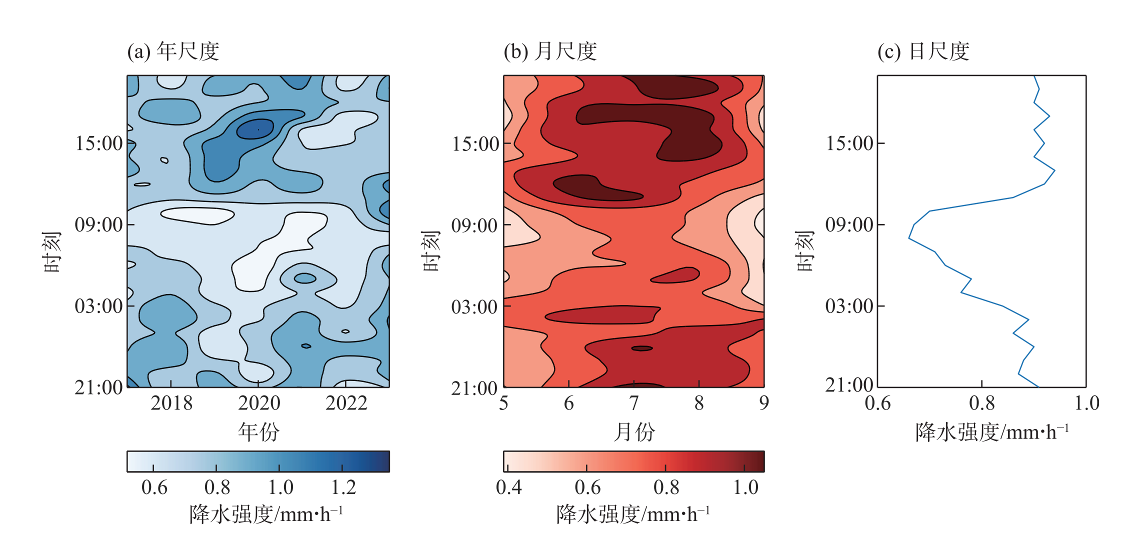


图4 不同时间尺度的逐时降水强度变化

Fig. 4 Hourly variation of precipitation intensity at different time scales

夜时段呈减少趋势，说明月份增加，降水强度在前半夜时段较大，后半夜时段较小。在日内(图4c)，降水强度虽然呈单峰分布，但趋势波动较小，高值主要出现在12:00—24:00时段，峰值为13:00，低值主要出现在06:00—10:00时段，峰谷为8:00。综上所述，降水强度除在年尺度的上午时段增加明显外，月尺度及日变化在前半夜时段增加更明显。

2.1.4 相关性分析 由表1可知，不同时间尺度下的暖季降水量与降水频次的相关性最好，均通过了0.05的显著性检验，与降水强度的相关性次之，而降水频次与降水强度的相关性较差。其中，年尺度下的降水量受降水频次的影响显著，但降水量与降水强度的相关性不显著；月尺度中，虽然降水量与降水强度的相关性显著，但受降水频次的影响更大。此外，仅有降水频次与降水强度的小时尺度相关性通过了0.01的显著性检验。由此可知，巴音布鲁克盆地暖季降水量主要受降水频次影响。

2.2 雨强变化特征

根据图5a可知，$R_1 \leq 2.0$ mm的量级不仅降水量多，降水频次也最大，分别占总降水量、总降水频次的49.52%、87.28%，其次为2.1 mm$\leq R_1 \leq$4.0 mm的量级，而$R_1 \geq$6.1 mm的量级与4.1 mm$\leq R_1 \leq$6.0 mm的量级相比，降水频次前者仅为后者的62.21%，但降水量为后者1倍多。对比图5b~c，发现各量级的降水

表1　不同时间尺度下降水量、降水频次和降水强度的相关性

Tab. 1　Correlation coefficient of precipitation, precipitation frequency and precipitation intensity at different time scales

相关类别	时间尺度		
	年	月	逐时
降水量—降水频次	0.72*	0.99**	0.94**
降水量—降水强度	0.31	0.96**	0.93**
降水频次—降水强度	0.43	0.93*	0.75**

注：*、**分别表示通过了0.05和0.01的置信度检验。

量与降水频次日变化特征较为一致。在R_1≤2 mm的量级中，降水量与降水频次的最大峰值分别出现在23:00和20:00，峰谷均出现在08:00，高值主要出现在17:00—01:00时段，低值主要出现在04:00—14:00时段。在2.1 mm≤R_1≤4.0 mm的量级中，降水量与降水频次有2个相同的高值出现时段，分别在11:00—15:00时段和18:00—03:00时段，低值则一致出现在04:00—10:00时段，最大峰值均出现在15:00，峰谷均出现在09:00。在4.1 mm≤R_1≤6.0 mm的量级中，降水量与降水频次的最大峰值均在24:00，峰谷均在

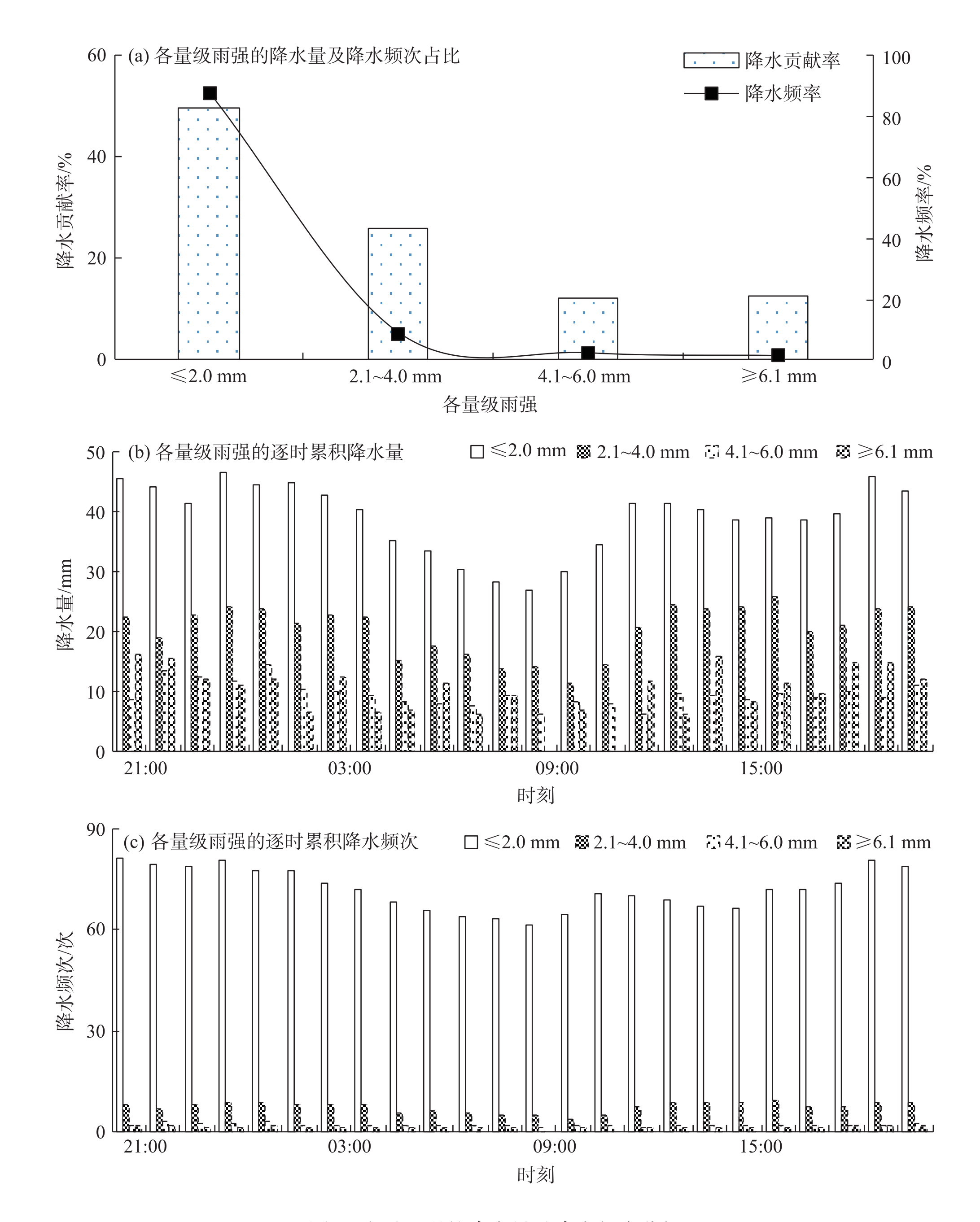


图5　小时雨强的降水量及降水频次分析

Fig. 5　Analysis of precipitation amount and precipitation frequency in hourly rainfall intensity

11:00，高值集中在21:00—01:00时段，低值则主要在8:00—11:00时段。在R_1≥6.1 mm的量级中，降水量与降水频次的2个峰谷，均分别出现在08:00和10:00，最大峰值均出现在21:00，高值集中出现在17:00—01:00时段，低值集中出现在06:00—10:00。由此可知，各量级雨强在1 d内的21:00—01:00时段，不仅较易发生且降水量较大，而06:00—10:00时段则相反。

2.3 不同过程降水变化特征

2.3.1 不同时间分析 由图6a~c可知，逐年的过程降水出现次数及持续时长，均以0.1 mm≤R≤6.0 mm的量级为主，但在降水贡献程度上，除2020—2022年间，以0.1 mm≤R≤6.0 mm的量级降水贡献程度最大外，其余年份均以R≥12.1 mm的量级为主，且其出现次数及持续时长随年际呈减小趋势，根据图2结论，可知2022年暖季降水量较小，可能与大到暴雨过程较少有关。由图6d~f可知，各月出现次数及持续时间最多的过程降水量级与年尺度一致，也以0.1 mm≤R≤6.0 mm的量级为主，而降水贡献程度上，5月和9月以0.1 mm≤R≤6.0 mm的量级为主，分别占各月总降水量的52.37%、48.42%，6—8月则以R≥12.1 mm的量级为主，均占各月总降水量的40%以上。结合表2可知，巴音布鲁克盆地暖季过程降水事件以0.1 mm≤R≤6.0 mm的量级为主，但R≥12.1 mm的量级对整体降水量的贡献最大，而6.1 mm≤R≤12.0 mm的量级，平均每年暖季会发生该过程降水7.09次，

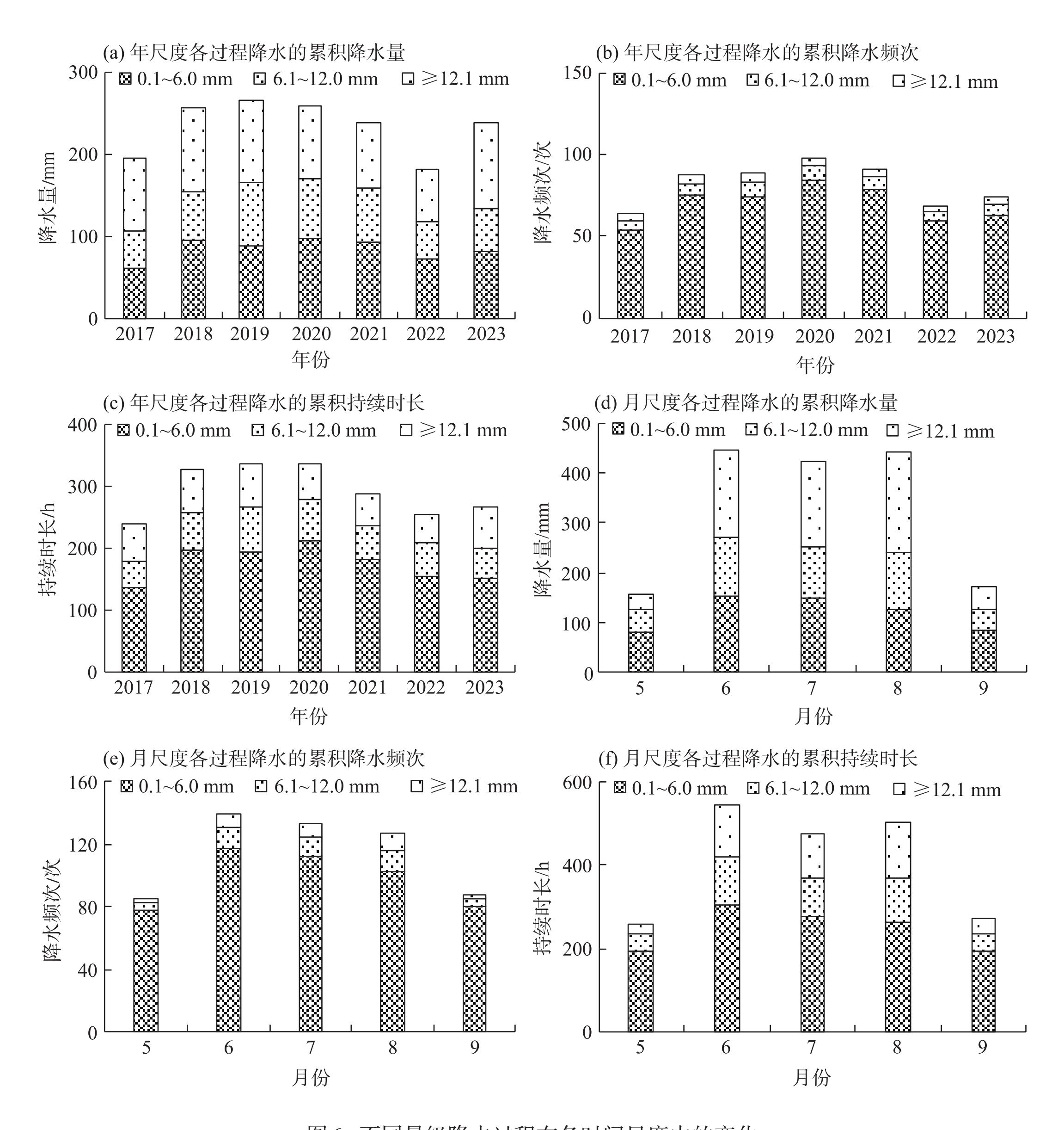


图6 不同量级降水过程在各时间尺度中的变化

Fig. 6 Changes of precipitation processes of different magnitudes at different time scales

表2　不同量级降水过程的降水量、频次及持续时间对比分析

Tab. 2　Comparative analysis of precipitation amount, frequency and duration of precipitation processes of different magnitudes

降水量级/mm	降水贡献率/%	降水频率/%	持续时间占比/%	平均降水量/mm·次$^{-1}$	平均持续时间/h·次$^{-1}$
0.1≤*R*≤6.0	36.12	85.64	59.83	1.21	2.51
6.1≤*R*≤12.0	25.81	8.67	19.41	8.53	8.05
R≥12.1	38.07	5.69	20.77	19.20	13.15

注：*R*为降水量。下同。

每次持续时长8.05 h且降水量为8.53 mm。

2.3.2　不同时段特征　由表3可知，总降水量、总降水频次及总持续时间，盆地昼间分别比夜间多17.83%、28.57%和13.26%，下午为降水量、出现次数及持续时间最大的时段，分别占到总降水量、总降水频次及总持续时间的32.56%、31.22%及30.01%，后半夜时段相反。上午时段虽然出现次数与前半夜时段接近，仅差3.17次，但在降水量、持续时间上，前半夜时段比上午时段分别多36.98%、22.24%。对比各时段的降水强度，前半夜时段最大，为3.46 mm·次$^{-1}$，次之为下午时段，为2.99 mm·次$^{-1}$，而上午与后半夜时段较为一致，分别为2.47 mm·次$^{-1}$和2.44 mm·次$^{-1}$。由此可知，暖季降水以昼雨为主，下午为1 d中最易出现降水时段，不仅降水贡献率大，且持续时间长，但前半夜时段的降水强度最大。

对过程降水量来说，各量级最易在下午时段发生，分别占各量级总降水频次的30.99%、33.00%和32.08%；降水量上，0.1 mm≤*R*≤6.0 mm和6.1 mm≤*R*≤12.0 mm的量级，均以下午时段最大，分别占各量级总降水量的33.67%和33.12%，而*R*≥12.1 mm的量级则为前半夜时段，占该量级总降水量的31.81%；而持续时间上，各量级过程降水量的变化与总降水量一致。综上可知，过程降水中0.1 mm≤*R*≤6.0 mm和6.1 mm≤*R*≤12.0 mm的量级在1 d的下午时段最易出现，且降水量大、持续时间长，而*R*≥12.1 mm的量级下午出现概率最大，但前半夜的降水贡献率最大，持续时间最长。

2.4　不同持续时间降水变化特征

降水的日循环特征与降水的持续性之间存在紧密关联[26]，因而基于不同降水过程在各时刻的降水量及起始时刻出现的次数，可得不同持续时间降水的日变化（图7），以期了解不同降水类型对降水日变化的影响。

2.4.1　降水量变化特征　巴音布鲁克盆地暖季降水量以长历时的降水贡献率最大，累积降水量随持续时间的增加而增大（图7a~b）。从整体看，降水持续12 h以上的累积降水量对总降水量的贡献程度最大，为25.87%，持续12 h的降水贡献率最少，仅有

表3　不同量级降水过程发生时段统计表

Tab. 3　Statistical table of occurrence time of precipitation processes of different magnitudes

时段	类别	降水量级/mm			总计
		0.1≤*R*≤6.0	6.1≤*R*≤12.0	*R*≥12.1	
上午	总降水量/mm	142.64	94.46	116.36	353.47
	总降水频次/次	125.44	11.22	6.61	143.28
	总持续时间/h	315.67	90.44	65.11	471.22
下午	总降水量/mm	199.63	140.27	194.43	534.33
	总降水频次/次	151.94	16.39	10.44	178.78
	总持续时间/h	357.78	129.72	124.89	612.39
前半夜	总降水量/mm	161.36	124.02	198.80	484.17
	总降水频次/次	116.06	14.56	9.50	140.11
	总持续时间/h	328.89	115.83	131.28	576.00
后半夜	总降水量/mm	89.19	64.79	115.32	269.30
	总降水频次/次	96.89	7.50	6.00	110.39
	总持续时间/h	230.50	63.56	86.67	380.72

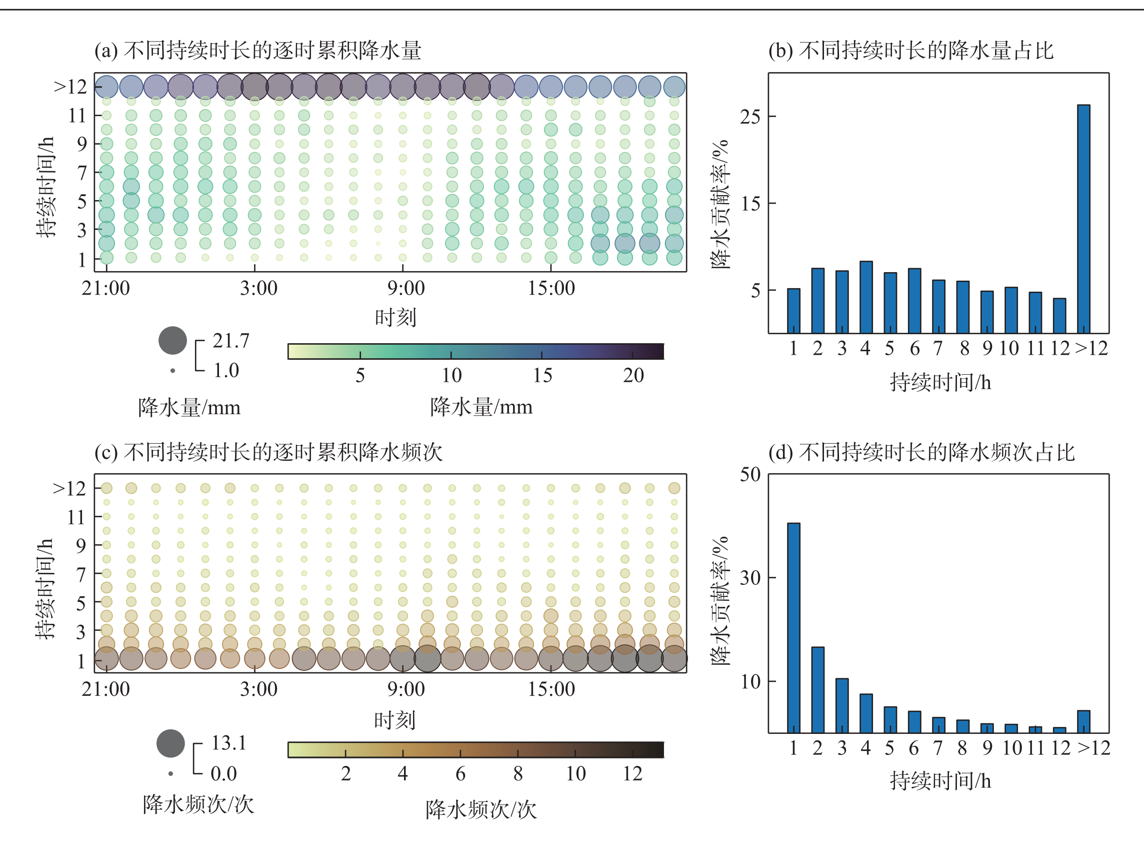


图7 不同持续时间降水的日变化

Fig. 7 Diurnal variation of precipitation with different durations

4.06%，其余持续时长对总降水量的贡献程度相差不大，多在5%~8%之间。经统计，持续6 h以上的降水类型最好，累积降水量最多，达到938.07 mm，占总降水量的57.15%，其次为4~6 h的降水，占总降水量22.9%，最少为1~3 h的降水，占总降水量的19.95%。从日变化看，随着持续时间的增加，降水量在各时刻的累积变化呈一定差异性，其中持续1~4 h的降水高值区在下午的15:00—20:00时段，峰值主要在18:00—20:00时段出现。持续5~8 h的降水与持续9~12 h的降水均在21:00至翌日02:00时段出现高值，峰值普遍出现在21:00—00:00时段，但前者在15:00—20:00时段高值也较为集中出现。持续>12 h的降水则自后半夜至上午的降水高值较多，极值位于后半夜的03:00，降水量达到了21.69 mm。总体看，持续8 h及以下的降水峰值多在下午，累积降水量较大，持续8 h以上的降水峰值多在前半夜，累积降水量次之，结合图1峰值区间及表3，可知降水量日变化的曲线及过程降水的高值时段大致可以通过两类不同降水过程的持续性进行区分。

2.4.2 降水频次变化特征 由图7c~d可得，巴音布鲁克盆地暖季多发短历时降水。就整体而言，累积降水频次以持续1 h最多，为231.78次，占总次数的40.48%，持续12 h最少，仅占总次数的1.07%。统计发现，持续1~6 h的降水次数最多，占总次数的84.36%，次之为持续7~10 h，占总次数9.02%，持续11 h及以上最少，仅有6.62%。从日变化看，各降水过程主要还是以持续1~3 h为主，其昼间出现次数为夜间的1.2倍，降水易发时段为15:00—20:00，18:00次数最多。持续4~6 h的降水，虽然高、低值区较为一致，但峰值出现位置有差异，其中最大值分别出现在15:00、11:00与21:00，最小值分别为08:00及05:00—06:00；持续7~10 h的降水共发生了51.67次，低值多集中在04:00—07:00时段，高值多在19:00—23:00时段；持续11~12 h的降水最少，共累积出现13.05次，但各时刻出现的次数均较少；持续>12 h的降水，多发生于17:00—02:00时段，尤其20:00最多，出现了1.94次，其昼间累积出现次数比夜间少4.28次。

3 讨论

研究发现，巴音布鲁克盆地暖季降水量受降水频次影响较大，两者的日变化特征具有一致性，高

值区均主要集中在18:00—21:00时段，4 mm·h^{-1}以上量级的雨强多在前半夜发生，这与已有研究结论一致[12-13,27]。但对比相近的伊犁河谷区域，发现两地降水事件虽均以短历时降水为主，但伊犁河谷以持续2 h的降水量贡献最大[28]，而巴音布鲁克盆地以长历时的降水贡献最大，尤其>12 h的降水量最多。根据降水机制及地形地貌条件发现，天山山区暖季主要受亚洲副热带西风急流影响，当西风急流偏南，易出现降水时间较长的系统性天气，而偏北多为降水时间较短的对流性天气[29]，因此西低东高呈喇叭口地形的伊犁河谷，易导致偏西，偏北气流阻挡抬升，形成短时对流性天气[30]，而海拔高且三面环山的巴音布鲁克盆地，更易受偏南气流引起的系统性天气影响[31]。同时根据各月高值区出现时长，发现8月时段最长，达到了12 h，6月次之，为10 h，7月最短，仅有6 h。由此可知，巴音布鲁克盆地的降水事件在6月与8月可能受系统性天气影响为主，7月则受对流性天气影响较大。

本文还发现时间尺度的区别，反映出的降水日变化特征有差异，如年尺度上降水量及强度在昼间增多，说明昼间发生强降水的可能性增大，月尺度上夜间降水量、频次及强度增加明显，说明夜间受系统天气影响的概率增多，而日内在下午至前半夜时段更易发生较强降水事件，表明下午发生对流性天气的可能性较高。后续将从空间尺度上深入开展研究，探讨地形对降水的影响，并引入卫星资料、数值模拟等方式，进一步了解巴音布鲁克盆地暖季降水日变化产生的物理机制，以期更好反映季风区降水的日变化特征。

4 结 论

（1）降水量与降水频次、降水强度在不同时间尺度上的日变化特征具有差异性，其中年尺度上，降水量、降水强度多在昼间增加，降水频次在夜间增加，月尺度上，三者均多在夜间增多，而日内在18:00—24:00时段，降水量多且频次高、强度大。

（2）降水量与降水频次、降水强度在时次分布上具有一致性，但降水量与降水频次的相关性更好，表明暖季降水量受降水频次影响较大。同时，各量级雨强在21:00至翌日01:00时段降水量较大且更易发生，并且R_1≤2.0 mm的量级不仅降水量最多，降水频次也最大。

（3）过程降水中0.1 mm≤R≤6.0 mm和6.1 mm≤R≤12.0 mm的量级在下午时段最易出现，且降水量大、持续时间长，而R≥12.1 mm的量级虽然下午时段出现概率大，但前半夜时段的降水贡献率最大，持续时间最长。

（4）降水事件以持续6 h以上的降水类型最好，不仅累积降水量最多，降水贡献率也最大，但持续1~3 h的降水类型出现次数最多，且多发生在15:00—20:00时段。同时，持续4~10 h的降水多集中在18:00—23:00时段，而持续10 h以上的降水以夜间出现次数居多。

参考文献（References）

[1] 戴泽军, 宇如聪, 陈昊明. 湖南夏季降水日变化特征[J]. 高原气象, 2009, 28(6): 1463-1469. [Dai Zejun, Yu Rucong, Chen Haoming. Characteristics of summer precipitation diurnal variations in Hunan[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(6): 1463-1469.]

[2] Betts A K, Desjardins R, Worth D, et al. Impact of land use change on the diurnal cycle climate of the Canadian Prairies[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(21): 11-12.

[3] Sperber, Kenneth R, Yasunari, et al. Workshop on monsoon climate systems: Toward better prediction of the monsoon[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87: 1399-1403.

[4] 胡亮, 杨松, 李耀东. 青藏高原及其下游地区降水厚度季、日变化的气候特征分析[J]. 大气科学, 2010, 34(2): 387-398. [Hu Liang, Yang Song, Li Yaodong. Diurnal and seasonal climatology of precipitation depth over the Tibetan Plateau and its downstream regions[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(2): 387-398.]

[5] 李红梅, 周天军, 宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 357-370. [Li Hongmei, Zhou Tianjun, Yu Rucong. Analysis of July-August daily precipitation characteristics variation in eastern China during 1958—2000[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 357-370.]

[6] 何清, 杨青, 李红军. 新疆40 a来气温、降水和沙尘天气变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 423-427. [He Qing, Yang Qing, Li Hongjun. Variations of air temperature, precipitation and sand-dust weather in Xinjiang in past 40 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 423-427.]

[7] Kincer J B. Daytime and nighttime precipitation and their economic significance[J]. Monthly Weather Review, 1916, 44(11): 628-633.

[8] Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(1): 223-234.

[9] 薛羽君, 白爱娟, 李典. 四川盆地降水日变化特征分析和个例模拟[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 885-894. [Xue Yujun, Bai Aijuan, Li Dian. Analysis and numerical simulation of diurnal variation of precipitation in Sichuan Basin[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(8): 885-894.]

[10] 唐红玉, 顾建峰, 俞胜宾, 等. 西南地区降水日变化特征分析[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 376-384. [Tang Hongyu, Gu Jianfeng, Yu Shengbin, et al. Analysis on diurnal variation of precipitation in southwest China[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2): 376-384.]

[11] He H, Zhang F. Diurnal variations of warm-season precipitation over northern China[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(4): 1017-1025.

[12] 朱小凡, 张明军, 王圣杰, 等. 2008—2013年新疆夏季降水的日变化特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 478-488. [Zhu Xiaofan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Diurnal variation characteristics of precipitation of Xinjiang in summer during 2008—2013[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(2): 478-488.]

[13] 陈春艳, 赵克明, 阿不力米提江·阿布力克木, 等. 暖湿背景下新疆逐时降水变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 692-702. [Chen Chunyan, Zhao Keming, Abulikemu Abulimitijiang, et al. Temporal and spatial distributions of hourly rain intensity under the warm background in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 692-702.]

[14] 郑博华, 李斌, 黄秋霞, 等. 新疆伊犁河谷冷暖季降水时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 80-87. [Zheng Bohua, Li Bin, Huang Qiuxia, et al. Diurnal variation characteristics of precipitation in the cold and warm season of Ili River Valley, Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(3): 80-87.]

[15] 杨霞, 于晓晶, 赵雅蕾, 等. 2011—2015年乌鲁木齐冬季降雪的日变化特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 603-609. [Yang Xia, Yu Xiaojing, Zhao Yalei, et al. Diurnal variation of winter snowfall in Urumqi of Xinjiang from 2011 to 2015[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(4): 603-609.]

[16] 赵勇, 黄丹青, 古丽格娜, 等. 新疆北部夏季强降水分析[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 773-779. [Zhao Yong, Huang Danqing, Guligena, et al. Analysis on summer heavy rainfall in the northern Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(5): 773-779.]

[17] 刁鹏, 李刚, 袁先雷, 等. 基于Budyko模型的巴音布鲁克山区暖季人工增水作业效果分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(12): 1963-1972. [Diao Peng, Li Gang, Yuan Xianlei, et al. Effect of artificial precipitation enhancement in Bayanbulak Mountain area in warm seasons based on Budyko model[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(12): 1963-1972.]

[18] 周雪英, 段均泽, 李晓川, 等. 近52年巴音布鲁克山区降水变化趋势与突变特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(5): 19-24. [Zhou Xueying, Duan Junze, Li Xiaochuan, et al. Analysis on tendency and abrupt change of daily precipitation in recent 52 years in Bayinbuluk Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2013, 7(5): 19-24.]

[19] 任芝花, 赵平, 张强, 等. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法[J]. 气象, 2010, 36(7): 123-132. [Ren Zhihua, Zhao Ping, Zhang Qiang, et al. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 123-132.]

[20] 于杨, 朱晨, 赵琦, 等. 全球地面气温和降水定时值数据整合与初步质量控制[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(6): 94-101. [Yu Yang, Zhu Chen, Zhao Qi, et al. Integration and preliminary quality control of global surface hourly temperature and precipitation data[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(6): 94-101.]

[21] 李胜楠, 高婧, 宋佳, 等. 库尔勒市主汛期降水日变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(2): 63-68. [Li Shengnan, Gao Jing, Song Jia, et al. Diurnal variation characteristics of precipitation in Korla in main flood season[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(2): 63-68.]

[22] Zhuo H, Zhao P, Zhou T J. Diurnal cycle of summer rainfall in Shandong of eastern China[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 742-750.

[23] 黄秋霞, 方雯, 王春燕, 等. 新疆昌吉市主汛期降水的日变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(6): 19-23. [Huang Qiuxia, Fang Wen, Wang Chunyan, et al. The characteristics of rainfall diurnal variation during flood season in Changji City, Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(6): 19-23.]

[24] 肖开提·多莱特. 新疆降水量级标准的划分[J]. 新疆气象, 2005(3): 7-8. [Duolaite Xiaokaiti. Formulation of precipitation intensity standard of Xinjiang[J]. Xinjiang Meteorology, 2005(3): 7-8.]

[25] 崔彩霞, 李杨, 杨青. 新疆夜雨和昼雨的空间分布和长期变化[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 903-907. [Cui Caixia, Li Yang, Yang Qing. Spatial distribution and long-term variation of nocturnal and daytime rainfall in Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(5): 903-907.]

[26] 李建, 宇如聪, 王建捷. 北京市夏季降水的日变化特征[J]. 科学通报, 2008, 53(7): 829-832. [Li Jian, Yu Rucong, Wang Jianjie. Diurnal variation characteristics of precipitation of Beijing in summer[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(7): 829-832.]

[27] 郭玉琳, 赵勇, 周雅蔓, 等. 新疆天山山区夏季降水日变化特征及其与海拔高度关系[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 57-65. [Guo Yuling, Zhao Yong, Zhou Yaman, et al. Diurnal variation of summer precipitation and its relationship with altitude in Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 57-65.]

[28] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 新疆伊犁河谷夏季降水日变化特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 369-375. [Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing. The daily variation characteristics of summer precipitation over the Yili River Valley, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2): 369-375.]

[29] 杨莲梅, 张庆云. 新疆夏季降水年际变化与亚洲副热带西风急流[J]. 应用气象学报, 2008, 19(2): 171-178. [Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Interannual variation of summer precipitation in Xinjiang and Asia subtropical westerly jet stream[J]. Journal of Applied

Meteorological Science, 2008, 19(2): 171−178.]

[30] 于晓晶, 赵勇. 地形对天山夏季降水影响的模拟[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1133−1143. [Yu Xiaojing, Zhao Yong. Simulation of orographic effects on summer rain in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1133−1143.]

[31] 杨莲梅, 杨青, 杨柳. 天山山区大气水分循环特征[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 107−116. [Yang Lianmei, Yang Qing, Yang Liu. Characteristics of the atmospheric moisture cycle over the Tian Shan Mountains[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(1): 107−116.]

Diurnal variation characteristics of warm season precipitation in the Bayanbuluke Basin of the Middle Tianshan Mountains

DIAO Peng, ZHOU Xueying, Nimicairen NUJIA, LIU Changyong

(Meteorological Bureau of Bayingol Mongolian Autonomous Prefectrue, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Diurnal variation in precipitation is a fundamental aspect of climate change, providing valuable insights into its effects on regional water resources. This study analyzes the diurnal precipitation patterns in the Bayanbuluke Basin, Xinjiang, China during the warm season (May-September) from 2017 to 2023, using hourly precipitation data from 18 meteorological observation stations. The findings indicate that the diurnal variation characteristics of precipitation amount, frequency, and intensity during the warm season exhibit overall consistency, albeit with differences across time scales. On an annual scale, precipitation amount and intensity predominantly increase during the day, whereas frequency rises at night. On a monthly scale, all three metrics show significant increases from the afternoon to the first half of the night. During the 18:00—24:00 period, precipitation is not only more frequent but also exhibits higher amounts and intensity, while the 07:00—10:00 period reflects the opposite trend. In the warm season, low-intensity rainfall (R_1≤2.0 mm) contributes the most to total precipitation, followed by moderate rainfall (2.1 mm≤R_1≤4.0 mm). Regarding precipitation processes (R), light rain (0.1 mm≤R≤6.0 mm) occurs most frequently, yet heavy to torrential rain (R≥12.1 mm) contributes the most to total precipitation. The afternoon period experiences the highest precipitation frequency and contribution. Among different precipitation durations, long-duration events exceeding 6 hours account for the largest contributions, whereas short-duration events (1−3 h) are more frequent, particularly during 15:00—20:00.

Key words: warm season; diurnal variation of precipitation; precipitation duration; Bayanbuluke Basin